

国际月球科研站综合选址研究

Research on Comprehensive Site Selection of the International Lunar Research Station

期刊：	中国科学: 技术科学
稿件ID：	SST-2026-0018.R2
稿件栏目：	论文
作者提交日期：	2026-04-29
参与作者列表：	杜省, 徐琳, 王琼, 方越, 贾瑛卓, 康志忠, 裴照宇, 彭兢, 邹永廖, 胡腾, 贺怀宇, 王赤
关键词：	国际月球科研站, 综合选址, QUACH-SSM, 高值聚类, 选址模型
英文关键词：	International Lunar Research Station (ILRS), comprehensive site selection, QUACH-SSM, high-value clustering, site selection model
学科领域：	航空航天与空间科学
专题：	

For Review Only

中国科学: 技术科学 XXXX 年 第 XX 卷 第 X 期: XX~XX
SCIENTIA SINICA Technologica tech.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

国际月球科研站综合选址研究

杜省[①], 徐琳[②], 王琼[③*], 方越[④], 贾瑛卓[②], 康志忠[⑤], 裴照宇[③*], 彭兢[④], 邹永廖[②], 胡腾[⑤], 贺怀宇[⑥], 王赤[②]

① 深空探测实验室(天都实验室), 北京 100195;
② 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
③ 探月与航天工程中心, 北京 100190;
④ 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
⑤ 中国地质大学(北京)月球与行星遥感探测研究中心, 北京 100083;
⑥ 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
* E-mail: wangq2006@163.com; peizhaoyu2026@163.com

收稿日期: XXXX-XX-XX; 接受日期: XXXX-XX-XX; 网络出版日期: XXXX-XX-XX

摘要 月球探测正在从单次任务实施向长期建设驻留、多学科协同研究转型. 面向国际月球科研站以平台化形式开展科研作业活动、着陆和作业区域相对集中、任务之间高度耦合实现增量式建设等特点, 本研究提出了一种考虑区域间高值聚类的定性与定量结合的综合选址方法(QUACH-SSM), 应用于国际月球科研站站区选址工作中. 该方法首先以科学目标为输入, 利用专家经验与多轮论证法实现基于科学与应用需求的粗选址; 接着基于多源遥感观测数据的阈值筛选分析与多目标多要素选址方法实现基于工程约束的复选址; 最后引入区域间热点分析与综合评估模型实现高评分区域的聚类与细选址, 最终得出月球南极区域 11 个备选站址. 该综合选址方法在嫦娥八号任务中得到了应用, 也可为国际月球科研站建设和其他相关深空探测任务选址研究提供参考.

关键词 国际月球科研站; 综合选址; QUACH-SSM; 高值聚类; 选址模型

0 引 言

月球作为人类探索宇宙的重要窗口、太空资源开发的首选平台和前往更远深空的前哨基地, 其战略价值日益凸显. 随着全球第二轮月球探测热潮兴起, 中国和美国分别提出国际月球科研站[1]和阿尔忒弥斯(Artemis)计划, 标志着月球探测的核心目的正在从“认识月球”向“利用月球”转变, 任务模式从单次任务短期实施向多次任务集聚累加建站、实现长期驻留转变[2].

相较于之前月球着陆探测任务的单点选址逻辑, 国际月球科研站站址的选择既要保证多次任务安全着陆、作业活动协同可靠运行等工程可实施性, 又要

引用格式: 杜省, 徐琳, 王琼, 等. 国际月球科研站综合选址研究. 中国科学: 技术科学, XXXX, XX: XX–XX
Du X, Xu L, Wang Q, et al. Research on Comprehensive Site Selection of the International Lunar Research Station (in Chinese). Sci Sin Tech, XXXX, XX: XX–XX, doi:

© XXXX《中国科学》杂志社 www.scichina.com

For Review Only

以多学科科学目标为牵引，选择尽可能满足科学观测约束、有利于科学发现的布站位置. 如何统筹考虑着陆安全性、科学目标丰富性，以及科研作业活动的长期协同性，已成为当前国际月球科研站选址方法研究面临的关键问题.

目前常用的多种选址方法各有侧重，适用于不同的任务需求.

(1)专家经验与多轮论证法

早期探月任务常采用此方法，主要依靠各领域专家知识和自身经验，经多轮研讨论证后确定着陆区. 例如美国的阿波罗计划. 该方法能保证一定的科学性，但因专家知识体系和研究视角不同，在面对月球科研站多目标多要素协同决策时效率较低，存在主观性较强、意见较难统一的问题.

(2)基于遥感观测数据的阈值筛选法

利用遥感技术获取的月表数据，如地形、地质、资源分布等信息，设定坡度、光照时长、着陆区范围等阈值[3][4]，筛选出符合条件的着陆区域. 该方法在嫦娥系列任务中有所应用[5]-[7]. 通过基于遥感观测数据的阈值筛选法提升了客观性与筛选效率[8][9]，能快速排除明显不合适区域，但对多目标复杂环境适应性差，要素优先级动态调整灵活性不足，难以满足例如月球科研站等复杂任务的多元需求.

(3)基于历史任务着陆点数据的机器学习法

收集分析历史任务着陆点数据，构建历史任务目标、约束条件与选址位置之间的机器学习模型，预测适宜着陆区域[10]. 该方法可实现自动化分析，能处理大量数据. 不过因月球环境复杂，不同区域差异大，且面对月球科研站任务目标和要求与历史任务有所不同，模型预测结果参考价值和泛化能力还有待提升.

(4)基于多准则决策分析的多目标多要素综合选址方法

该方法是一种综合工程和科学目标/因素的选址方法，通过选址要素提取、网格化数据处理和逼近理想解算法[11](Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)的选址评价[12][13]，平衡主客观考虑，输出最合适候选地点的定量描述. 该方法可考虑到更广泛的选址因素[14]，综合权衡多个目标的重要性与相关性，是一种更加自动化和可量化的方法[15]，但其中专家智慧仅体现在构建要素判断矩阵阶段，缺少定性分析与判断，不便对科学研究价值进行“一区一议”、具体分析与权衡，且尚未能满足多任务集群与长期协同需求.

综上，现有月球着陆选址相关研究中，传统选址方法存在明显局限：专家经验论证易受主观偏差影响，阈值筛选法缺乏灵活调整空间，机器学习预测模型因月球环境特殊性导致泛化能力不足，多目标选址难以统筹复杂任务集群与长期协同运营需求，整体存在决策效率低、适配性不足等问题. 面向国际月球科研站以平台化形式开展科研作业活动、着陆和作业区域相对集中、任务之间高度耦合实现增量式建设等特点，应结合多种方法的优点，形成科学系统、高效适用的选址方法.

本研究提出了一种考虑区域间高值聚类的定性与定量结合的综合选址方法(A Comprehensive Site Selection Method Combining Qualitative and Quantitative Analysis with Consideration of High-Value Clustering Between Regions, QUACH-SSM)，首先以科学目标为输入，利用专家经验与多轮论证法实现基于科学与应用需求的粗选址；接着基于多源遥感观测数据的阈值筛选分析与多目标多要素选址方法实现基于工程约束的复选址；最后引入区域间热点分析与综合评估模型实现高评分区域的聚类与细选址，得出月球南极区域 11 个备选站址. 该综合选址方法在嫦娥八号任务中得到了应用，也为国际月球科研站建设和其他相关深空探测任务选址研究提供参考.

综合选址方法 QUACH-SSM 融合了专家经验与数据驱动思路，针对现有选址方法缺乏定性分析、难以满足月球科研站平台化与集群化需求的问题，创新性地将热点聚类分析与综合评估模型融入选址全过程，既突破单一方法的局限，又完善了多目标选址的分析框架，提升了选址结果的科学性与适配性，弥补了现有研究在区域协同聚类分析方面的不足，可为国际月球科研站多器协同着陆、长期可靠运行与规模化科研作业提供更具科学性与可操作性的站址方案支撑，具有较强的工程实用价值与任务应用前景.

1 选址需求

1.1 科学需求

国际月球科研站聚焦五大科学主题，即月球地质、日地联系、月基天文、基础科学、资源利用[2][16][17]. 为了实现其科学目标与科学探测任务，选址应满足如下科学需求:

1)月球地质科研活动对选址的需求

a) 月表内部结构研究

为有效获取月球内部圈层结构等信息，月球科研站选址应优先保障多点、大间隔布设的基本要求. 站点间距宜在公里级以上，以提升月震事件定位精度与层析成像分辨率.

b) 月球地质探测

选址区域应尽可能涵盖多样且具有代表性的地

质单元, 以支持重建月球从早期岩浆洋演化、撞击增生、火山活动到后期空间风化等关键阶段. 例如月海与高地的过渡带、多期次岩浆喷发序列、典型构造单元等, 以实现科学目标的最大化[18][19].

2)日地联系科研活动对选址的需求

月球是开展日-地-月空间环境观测与研究的独特平台, 不仅可对月面环境、地球磁层、地球宏观情况及太阳活动进行多角度观测, 还能将日-地-月系统视为一个整体, 系统研究太阳活动及其变化对地月空间的驱动作用. 在地球磁层观测方面, 重点关注三个关键结构: 日下点磁层顶、南极区与北极尖区. 为实现对磁层整体的有效成像, 需将这三个区域同时纳入视场, 以便综合分析各区域物理过程之间的关联机制. 因此, 要求观测点的地形应位于月面高地, 周边视野开阔无遮挡, 并尽可能保证可见时长, 以满足持续观测的需要.

3)月基天文科研活动对选址的需求

月球是天文学研究的理想观测平台, 为确保月基天文巡天观测的有效实施, 望远镜设备需具备尽可能广阔的天空覆盖范围, 同时应尽量降低着陆点周边地形及其他施对观测视场的遮挡影响. 具体而言, 选址区域应满足在地平高度大于 15°的范围内无任何遮挡[20]-[22]的坡度要求, 以保证观测天区的完整性与观测数据的连续性.

4)基础科学科研活动对选址的需求

利用月球表面的高真空、低重力、极弱磁场、强宇宙射线环境以及部分区域的极低温环境, 可以有针对性地开展物理(例如探测新粒子)、材料(例如开发新型合金或晶体生长)、生命(例如研究生命在极端环境下的适应机制)等基础科学实验, 但此类实验总的来说对选址不构成强约束.

5)资源利用科研活动对选址的需求

月球资源利用活动划分为能源获取与利用、矿物开采与转化、月基建造与运维[18]等三大类[2][23], 其中对选址产生约束的主要是矿物开采与转化. 月球上的典型矿物资源包括水冰、钛铁矿、氦-3 等. 从月球水(冰)利用的角度, 目前国际主流看法是到月球南极区域的永久阴影区开采水冰并进行运输、提纯、储存并制备氢氧[24]; 从钛铁矿利用的角度, 钛铁矿广泛分布于月球表面, 在中低纬度月海存在高钛玄武岩赋存区域[25][26]. 考虑到国际月球科研站是试验型科研设施, 难以涵盖所有种类的资源利用活动, 应重点围绕水冰和钛铁矿开展技术验证, 其中水冰对选址的约束较强.

1.2 工程约束

国际月球科研站是由多次任务构成的长期建设项目, 各次任务落区相距一定距离, 应考虑在以通信中枢为中心半径 R 公里范围的区域内, 具有多个(6 个及以上)相隔一定距离的安全着陆区.

1.2.1 安全着陆的相关约束

1) 着陆坡度

着陆区内坡度应足够平缓以保证着陆器可通过避障安全着陆于月面, 根据着陆器的设计状态, 约束着陆区的最大坡度值$\theta_{\mathrm{ldg_max}}$, 在此基础上, 着陆区坡度越小越好.

2) 着陆区大小

着陆区大小应保证在制导、导航与控制系统现有的着陆精度下, 着陆器可着陆于着陆区范围内, 着陆区应不小于$a \times a$.

1.2.2 月面工作的相关约束

1) 着陆区附近坡度

考虑到着陆后勘察探测机器人、服务作业机器人、工程建设机器人等月面移动模块还需在着陆区附近进行巡视探测和作业, 要求着陆区附近有连续的坡度$\leqslant\theta_{\mathrm{rvg_max}}$的区域供移动路径规划, 在此基础上, 移动范围内坡度越低、高程起伏越小、平坦地形面积越大越好.

2) 着陆区及附近巡视范围内的光照条件

月球南极太阳高度角较低, 叠加崎岖地形, 容易产生地形阴影, 遮挡探测器各模块的太阳翼, 影响其能源安全. 考虑着陆后长期探测需求, 着陆区及其附近巡视范围内的光照条件应满足全年平均光照率不小于η_{sun_avg}, 以及每月连续光照时长不小于T_{sun_cont}天.

3) 着陆区及附近巡视范围内的测控条件

为满足测控通信需求, 要求在地形影响条件下, 着陆区及附近巡视范围内在月昼期间对地球和中继星的测控可见弧段时长$T_{tt\&c}$越长越好.

4) 着陆区及附近巡视范围内的器间通信条件

考虑到各月面模块间通信的可见性, 着陆区及附近巡视范围内的高程起伏越小越好, 着陆点应尽可能位于附近作业范围内的地形最高点.

1.2.3 多任务协同的相关约束

国际月球科研站各次任务着陆器之间尽可能没有遮挡物, 视距内可见, 保证月面通信网络畅通. 由于国际月球科研站各月面模块可能存在协同工作的需要, 分布在不同位置的模块需尽可能存在同时间段内的光照条件.

2 技术流程与研究方法

国际月球科研站选址工作采取了先基于科学价

值考量、分阶段筛选出数个大范围备选区域，后开展科学价值与工程约束多轮迭代、缩小备选站址范围的选址思路.

2.1 技术流程

基于科学价值考量的选址工作历经了三个阶段，组织上百位中外科学家参与研究和讨论，历时 4 年完成选址工作. 第一阶段考虑科学需求，在全月范围内筛选出覆盖了熔岩管、水冰、SPA 撞击事件等具有科学价值的 30 个备选站址；第二阶段基于科学目标可实现性的最大化原则，对备选站址进行了优选，覆盖了月球表面主要特殊地质构造、水冰、SPA 撞击事件、撞击过程、火山、玄武岩、月表磁场、太阳风等高价值探测对象，选址范围从 30 个备选站址缩小到月球正面、南纬 60 度以上区域，并从综合设站长期运营的角度，对 30 个备选站址进行筛减和增补，调整为 13 个备选站址. 第三个阶段，考虑到水冰资源探测和利用是当前世界月球探测的热点和前沿，并且应合理衔接探月工程四期任务、充分继承有关技术和科学研究成果将选址范围进一步聚焦到月球正面、南纬 80 度以上区域，备选站址从 13 个筛减为 4 个：阿蒙森撞击坑(Amundsen)、莱布尼兹贝塔高原区域(Leibniz β)、卡比厄斯(Cabeus)撞击坑以及沙克尔顿杰拉许连接脊(Shackleton). 以此为基础，开展了科学定性与工程定量结合分析的选址工作，即本文下述的研究内容.

针对国际月球科研站科学目标种类丰富、多任务关联集群与任务间长期协同的模式和特点，本研究提出了一种考虑区域间高值聚类的定性与定量结合、由粗及精逐步递进的 QUACH-SSM 综合选址方法，应用于国际月球科研站站区选址工作中. QUACH-SSM 法的技术路线如图 1 所示. 首先以科学目标为输入，利用专家经验与多轮论证法实现基于科学与应用需求的百公里级别的粗选址，完成第一轮科学初筛；接着基于多源遥感数据的阈值筛选与数据分析，利用多目标多要素综合选址方法，实现基于工程约束的十公里级别的复选址；之后引入区域间热点分析法实现高值聚类，构建综合评估模型对复选址结果开展综合评估，获得高评分的最终备选区域，完成第二轮综合选址.

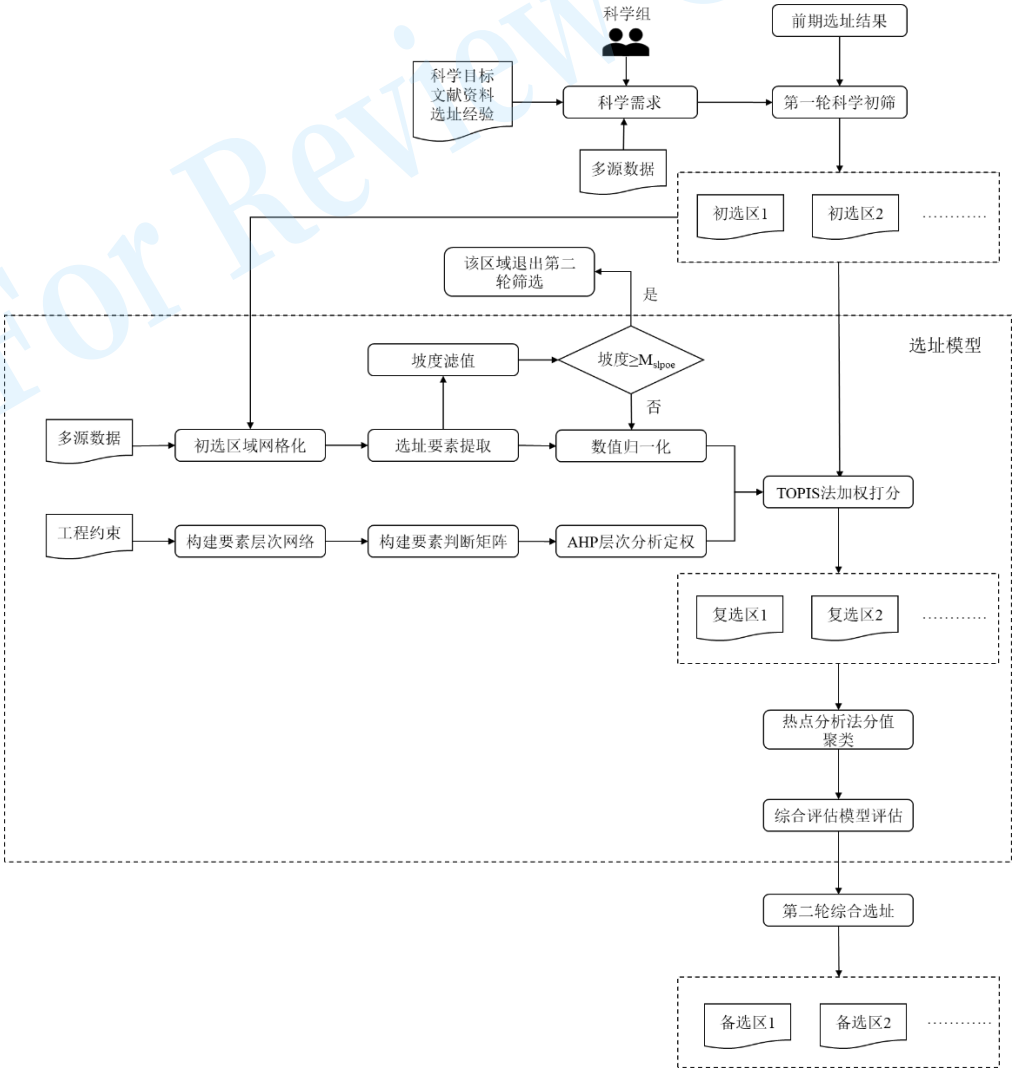


图 1 QUACH-SSM 法技术路线图

Figure 1. Technical Roadmap of the QUACH-SSM Method

2.2 第一轮科学初筛

基于国际月球科研站任务的科学与应用需求，针对阿蒙森撞击坑、莱布尼兹贝塔高原区域、卡比厄斯撞击坑以及沙克尔顿杰拉许连接脊四大区域，利用月球勘测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)的3m分辨率的数字正射影像(Digital Orthophoto Model, DOM)、20m分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为基础，构建区域地质图、天空可视性、对地可视度、物质成分、磁异常分布、永久阴影区分布等选址科学数据，开展地质特征、天文观测、地球整体成像和磁层观测、水冰和矿产资源分布等科学要素的初步分析，考虑光照、坡度、对地可视度等工程条件，基于多要素选址结果，并综合专家经验，实现国际月球科研站选址的第一轮科学初筛/粗选址.

为提升该筛选过程在任务目标变化、异常工况下的适用范围与可靠性，重点针对科学要素数据不清晰、专家经验存在分歧或任务目标调整等场景，可通过图层叠加[27]、加权打分、一致性检验等量化手段，结合多轮迭代论证、跨领域专家协同研判等非量化方式[28]，优化筛选逻辑，化解决策分歧，确保科学初筛结果的稳健性与适配性，有效应对各类复杂工况下的选址需求.

2.3 第二轮综合选址

2.3.1 数据来源

利用历史探测任务获得的基础多源数据和基于此生产的全月或局部高精度制图产品，多角度、全方位地分析和研究适合选址的区域，是着陆区选址评价过程中的重要手段[4][29]-[31]. 本次研究基于嫦娥二号20m分辨率DOM、20m分辨率DEM、嫦娥一号激光高度计和月球轨道激光高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)数据、部分区域3m、1m高精度DOM数据以及几何光照模型、可见通信模型等，对月球南极的地形、光照、通信等条件进行全面分析，为国际月球科研站的综合选址提供支持，详见表1.

表 1 选址要素对应的选址原则/目标和数据来源/模型

Table 1. Site Selection Principles/Objectives and Data Sources/Models Corresponding to Site Selection Factors

选址要素		选址原则/目标	数据来源/模型
地形条件	坡度	着陆点应选址坡度较小的区域(例如坡度<8°)	嫦娥二号 20m 分辨率 DOM、20m 分辨率 DEM
	高程	着陆区域内高程起伏不大；对天对地观测时着陆点需选择高程较高的区域	部分区域 3m、1m 高精度 DOM 数据
光照条件	平均光照时长/率	平均光照时间较长	LOLA、嫦娥一号激光高度计数据 几何光照模型
	最长连续光照时长	最长连续光照时长较长	
通信条件	平均通信时长/率	平均通信时间较长	LOLA、嫦娥一号激光高度计数据 可见通信模型
	最长连续通信时长	最长连续通信时间较长	

2.3.2 构建选址模型

通过构建选址模型可实现第二轮综合选址，具体包括四个方面:

(1)基于多源遥感数据的阈值筛选与数据分析

依据选址需求，明确选址原则/目标，利用多源遥感数据进行数据处理与分析，基于几何光照模型和可见通信模型反演光照和通信数据，得到选址各类工程要素的量化值数据. 基于多源数据的分析结果，在网格化的基础上进行要素值提取并进行预处理，将提取的数据统一归一化，消除量纲影响. 由于安全着陆为必要条件，国际月球科研站着陆点坡度值必须小于最大坡度值$\theta_{\mathrm{ldg_max}}$，在选址要素提取时开展坡度阈值滤波，若坡度值大于阈值，则该区域退出第二轮筛选，若满足坡度基本约束，则可继续进行数值归一化. 其中，考虑着陆区内坡度应足够平缓以保证着陆器安全着陆，根据着陆器的设计状态，约束坡度阈值，例如此处$\theta_{\mathrm{ldg_max}}$取8°为最大坡度值.

(2)多目标多要素综合选址方法

首先采用特定大小网格对预选着陆区范围进行网格化. 考虑着陆器能成功着陆在预选范围内，需根据着陆精度约束网格尺度，例如据公开资料显示，我国嫦娥七号目前能够实现百米级着陆精度，由此着陆范围考虑±100m，则此处$a \times a$网格尺度取 200m. 以

For Review Only

网格为空间约束，对多源遥感数据的数据分析结果进行要素值提取．采用线性比例法对提取后的要素进行归一化处理:

$$\hat{X}_i = \frac{X_i}{\max(X)}. \quad (1)$$

式中，$\hat{X}_i$为归一化后的要素值，X_i为初始要素值，$\max(X)$为指定范围内要素中的最大值．

接着利用层次分析法构建要素层次网络，形成要素判断矩阵，从而进行权值确定．层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)[32][33]是一种定性分析和定量分析相结合的评价决策方法，其基本思路是把一个复杂问题中的各个指标通过划分相互之间的关系使其分解为若干个有序层次．每一层次中的元素具有大致相等的地位，并且每一层次与上一层次和下一层次有着一定的联系，层次之间按隶属关系建立起一个有序的递阶层次模型．在递阶层次模型中，按照对一定客观事实的判断，一般主要采用专家意见法，然后对每层的重要性以定量的形式加以反映，通过两两对比判断的方式确定每个层次中元素的相对重要性，并用定量的方法表示，进而建立判断矩阵．然后利用数学方法计算每个层次的判断矩阵中各指标的相对重要性权数．最后通过在递阶层次结构内各层次相对重要性权数的组合，得到全部指标相对于目标的重要权数．层次分析法是一种对较为复杂、较为模糊的问题进行决策的简易方法，主要应用于具有不确定性以及具有多数个评估准则的决策问题上[15].

其中，层次分析法通过专家两两比较构建判断矩阵，易受专家知识背景、主观偏好及认知差异影响，导致权重赋值存在一定主观性，可能降低月面选址结果的客观性与稳定性．针对月球南极环境复杂、科学与工程目标耦合紧密的特点，本研究采用多专家群体决策结合一致性检验的加权平均法弱化主观偏差，对不满足一致性的矩阵进行剔除或迭代修正，对一致性高的矩阵分配更高的可信度权重；同时引入空间数据特征辅助权重校准，实现主客观赋权融合，提升月面选址指标权重的合理性与结果可靠性．

本研究以工程约束为输入，考虑三方面因素：地形条件、光照条件和通信条件，共包括六种选址要素:一定区域内的平均坡度、一定区域内的高程极差、年平均光照时长、最长连续光照时长、年平均通信率、最长连续可通信时长．首先利用专家经验结合多层次分析法构建月面选址递阶层次结构模型，层次模型中从上至下依次为决策目标层和控制准则，如图2所示．接着如图 3，通过两两比较构造判断矩阵，必要时引入专家群体决策，并在完成所有判断矩阵后进行层次单排序与总排序的一致性检验[34][35]，对不满足一致性的矩阵进行剔除或迭代修正，对一致性高的矩阵分配更高的可信度权重，最后通过加权平均集结所有专家智慧，得到综合判断矩阵，求解要素最终权值．本研究通过一致性比例检验专家判断逻辑合理性，识别并修正主观比较中存在的矛盾与偏误，避免因个体认知差异导致权重失真，提升指标赋权的可靠性与合理性，为月面选址多目标决策提供严谨稳定的量化依据．

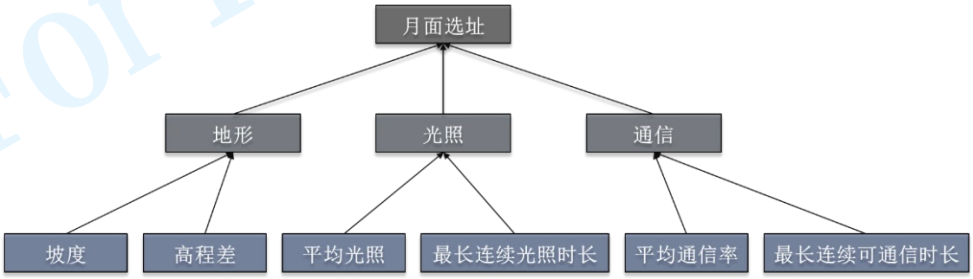


图 2 月面选址递阶层次结构模型图

Figure 2. Hierarchical Structure Model for Lunar Surface Site Selection

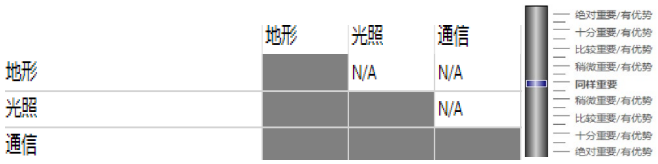


图 3 月面选址判断矩阵示意图

Figure 3. Schematic Diagram of Judgment Matrix for Lunar Surface Site Selection

基于 AHP 法的定权结果，对归一化后的要素值进行加权打分．由于选址要素种类较多，需要定量描述选址的优劣程度时，采用 TOPSIS 法对选址结果进行优化排序[12][36][27]. TOPSIS 法[11]是用于研究与理想方案相似性的顺序选优技术，即求解数据大小的优劣关系，因此结合数据间的大小找出正负理想解以及正负理想解距离，并且在最终得到接近程序 C 值，并且结合 C 值排序得出优劣方案排序.

在本研究中首先需要按照“符合选址原则的要素具有较大的分值, 并且各要素的分数取值空间相同”的原则转换要素数值, 数值转换包括正向化处理和逆向化处理, 目的是将选址要素数据依据其影响效果全部转化为标准化极大/极小型指标数据, 即正向要素数值越大越好, 反向要素则数值越小越好.

$$\widehat{Y}_i=\frac{\hat{X}_i-\min(\hat{X})}{\max(\hat{X})-\min(\hat{X})} \text{ 或 } \widehat{Y}_i=\frac{\max(\hat{X})-\hat{X}_i}{\max(\hat{X})-\min(\hat{X})}. \quad (2)$$

式中, $\widehat{Y}_i$为要素按照正/逆向化转换后的数值.

TOPSIS 法是将 n 个待评价的候选着陆区, 结合每个评价区域中的 m 个需要考虑的选择要素, 构成标准化矩阵 Z(评分矩阵), 解求理想最优解向量与理想最劣解向量. 通过计算每一个候选着陆区距离理想最优解与理想最劣解的距离D_i, 计算得到此候选着陆区的最终得分S_i, 该区域与最优解距离D_i越大, 分值S_i将越小, 反之则分值越大. 计算出最终得分S_i, 实现基于工程约束的复选址.

(3)基于热点分析法的分值聚类

热点分析法[37]可对候选着陆区中的每一个区域计算统计分值G_i^*(z 得分). 通过遍历查看每个候选区邻近要素环境中的每一个要素, 计算得到 z 得分和显著性水平(p 值)、置信度, 可以估计候选着陆区内高值或低值评分在空间上发生聚类的位置. 高值要素往往容易引起注意, 但可能不是具有显著统计学意义的热点. 要成为具有显著统计学意义的热点, 要素应具有高值, 且被其他同样具有高值的要素所包围. 某个要素及其相邻要素的局部总和将与所有要素的总和进行比较; 当局部总和与所预期的局部总和有很大差异, 以至于无法成为随机产生的结果时, 会产生一个具有显著统计学意义的 z 得分.

通过对 z 得分、p 值和置信度的阈值判断, 筛选得到高分聚类的备选着陆区. 本研究采用判断规则为:

$$p<0.05\Rightarrow \textit{结果显著}, \quad (3)$$

$$p<0.01\Rightarrow \textit{结果高度显著}. \quad (4)$$

因此当置信度为 95%时, 采用 95%置信水平作为统计显著性判断标准, 当选址区域满足

$$z>1.96\ \wedge\ p<0.05, \quad (5)$$

判定该区域为统计显著的高值热点聚类区; 若满足

$$z>2.58\ \wedge\ p<0.01, \quad (6)$$

则为高度显著的高值热点聚类区.

结合月面选址工程与科学目标需求, 优先选取高度显著的高值热点聚类区, 同时整合所有符合筛选标准的显著高值热点聚类区, 形成有效集合, 以此确定热点分析后的备选区域, 确保备选着陆区既具备高值集聚特征, 又具有可靠的统计显著性.

对于最终的统计学正 z 得分, z 分值越高, p 值越小, 高值(热点)的聚类就越紧密; 对于负 z 得分, z 分值越低, p 值越小, 低值(冷点)的聚类就越紧密; 如果 z 得分接近零, 则表示不存在明显的空间聚类. 由此对国际月球科研站的多个候选着陆区进行基于热点分析法的分值聚类, 在多目标多要素选址评分结果的基础上, 进一步分析高值评分聚类的区域. 其中, z 值得分越大表示该区域及其附近区域均具有较高的综合要素打分, 是满足高值聚类的区域, 且 p 值代表了显著性水平, 即该空间模式由随机生成的概率大小, 若 z 值大、p 值小, 则说明该区域高值聚集的同时并且显著, 是更为稀少独特的高价值区域, 由此可将其作为备选着陆区.

其中, 统计分值G_i^*可表示为:

$$G_i^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}x_j-\bar{X}\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}}{S\sqrt{\frac{\left[n\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}^2-\left(\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}\right)^2\right]}{n-1}}}, \quad (7)$$

式中, x_j是要素j的属性值, $w_{i,j}$是要素i和j之间的空间权重, n为要素总数, 且:

$$\bar{X}=\frac{\sum_{j=1}^{n}x_j}{n}, \quad (8)$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}x_j^2}{n}-(\bar{X})^2}. \quad (9)$$

(4)构建综合评估模型

从工程、地质、环境、资源四个核心维度出发, 本研究构建了国际月球科研站选址多层次综合评估模型, 通过指标拆解与权值分配, 在科学研究价值与工程实施可行性之间统筹平衡, 为选址结果的高分值聚集区提供系统全面的综合评估意见, 由此实现了高评分区域的细选址, 最终形成兼顾科学价值与工程可行性的国际月球科研站备选着陆区.

其中, 工程维度聚焦 6 项关键指标, 直接关系科研站的建设与运行保障. 低坡度占比决定着陆安全性与基建难度, 坡度越小越利于着陆器稳定降落和设备部署; 高程极差反映地形起伏程度, 平缓区域有利于周围作业与巡视探测; 光照是太阳能供电系统的核心保障, 直接影响设备健康与持续工作能力; 通信时长则为确保地月数据传输链路的稳定性, 保证测控的时效性.

地质、环境、资源维度的指标构成科学研究价值的核心评估体系. 地质维度考虑了撞击坑/盆地、月震活动、岩浆岩层、特殊构造等四个方面, 形成对在着陆区及附近区域开展月球成因、月球岩浆演化历史、物质组成差异、内部结构与动力学过程、内部能量活动、太阳系小天体撞击等研究项目的地质科研潜力的评估矩阵. 环境维度的 3 项指标关注空间环境对科研的影响, 分析地球遮挡情况以保证月基对地可见, 用于对地球开展多光谱、热辐射等观测; 地球磁层观测

For Review Only

条件决定磁层延伸区域的月基探测质量；月球磁场观测条件可用于发现重磁异常等现象. 资源维度聚焦水冰和矿产两大可开发资源，水冰储量与分布是生命保障和燃料制备的核心依托，决定基地自持能力；关键矿产丰度为就位资源利用提供可能，大幅降低地球运输成本.



图 4 月面选址综合评估模型图

Figure 4. Comprehensive Evaluation Model for Lunar Surface Site Selection

3 选址结果与分析

3.1 第一轮科学初筛

以国际月球科研站四大备选站址为输入，以科学组牵头，基于科学与应用需求，通过多要素选址和专家经验开展初步分析，实现第一轮科学初筛，具体分析如下.

1) Amundsen 撞击坑区域支撑的科学问题主要包括：月球深部物质构成与热演化历史; SPA 撞击事件；年轻构造活动；月球水和挥发分的分布与来源；月球资源探测与利用；月球磁场模型及内部电导率结构等.

2) Leibniz β 高原区域支撑的科学问题主要包括：月球深部物质构成与热演化历史; SPA 撞击事件；月球水和挥发分的分布与来源；月球资源探测与利用等.

3) Cabeus 撞击坑区域支撑的科学问题主要包括：月球深部物质构成与热演化历史；年轻构造活动；月球水和挥发分的分布与来源；月球资源探测与利用.

4) Shackleton 连接脊区域支撑的科学问题主要包括：月球深部物质构成与热演化历史；月球水和挥发分的分布与来源；月球资源探测与利用.

表 2 第一轮科学初筛分析表

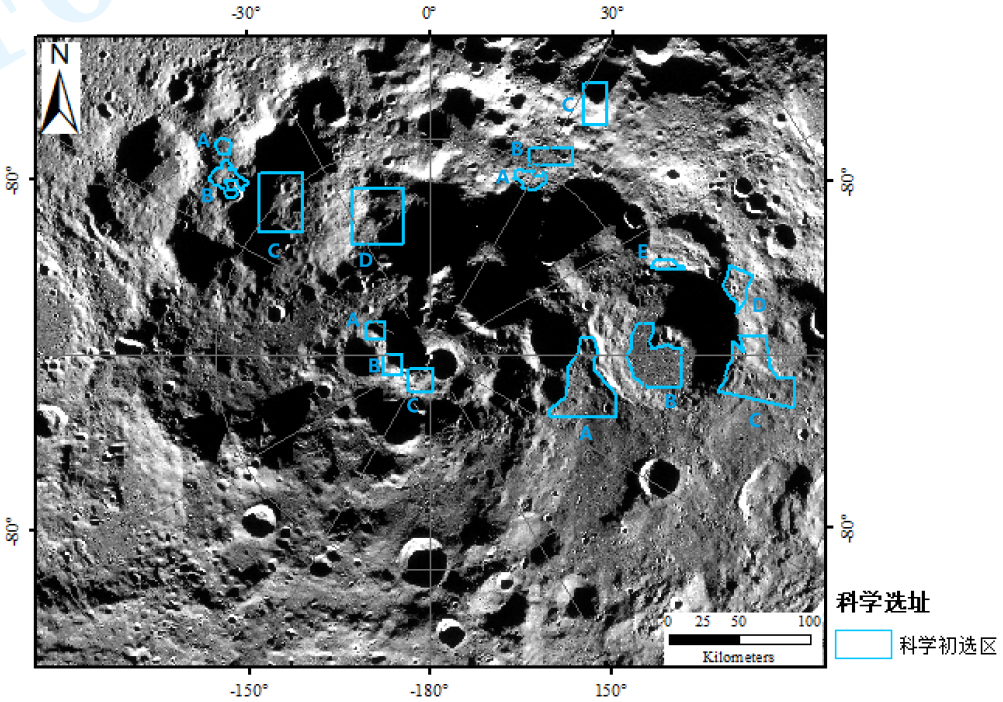
Table 2. Analysis Table for the First Round of Scientific Preliminary Screening

候选区	平均光照(占比)	最大光照(占比)	平均坡度	对地可视度(占比)	天文观测屏蔽	主要地质特点
Amundsen-A	0.273	0.51	9.97°	0.205	优	临近区域存在陡坎等高价值探测对象，存在雨海纪薛定谔盆地建造物质、SPA 盆地物质、艾肯纪阿蒙森-甘斯文特盆地建造物质，具备采样多样性；存在磁场空洞，存在地形缺口进入临近大型永久阴影区.
Amundsen-B	0.25	0.36	6.32°	0.37	优	存在小型永久阴影区，可靠近探测，满足挥发分与水冰探测采样分析；盆地内平坦度好，存在陡坎、火山穹庐、中央峰等高价值地质构造探测目标；存在玄武岩，可用于原位资源利用. 高程极低，可定点长周期钻取深部物质.
Amundsen-C	0.39	0.52	8.42°	0.18	差	南侧存在大片永久阴影区，可靠近探测，满足挥发分与水冰探测采样分析；存在溅射物质、撞击熔融物、撞击断裂等探测目标，疑似存在陡坎等年轻构造.
Amundsen-D	0.36	0.63	13.47°	0.42	良	临近区域都存在小型永久阴影区，可靠近探测，满足挥发分与水冰探测采样分析；存在 SPA 盆地物质、艾肯纪阿蒙森-甘斯文特盆地建造物质，哥白尼纪撞击熔融溅射物质.
Amundsen-E	0.32	0.54	13.2°	0.51	中	

For Review Only

Leibniz β-A	0.325	0.76	10.383°	0.594	中	位于 SPA 撞击坑盆地坑缘溅射区，存在 SPA 事件物质采集可能性．以撞击坑和浅层断裂构造为主．多处微型冷阱，便于水冰探测和取样．
Leibniz β-B	0.34	0.52	1.87°	0.66	差	地表溅射物来源丰富，可能存在外露的地幔层岩石，在此区域开展物质探测有利于采样到月幔等物质．
Leibniz β-C	0.23	0.26	0.99°	0.36	良	临近区域存在大片零散小型永久阴影区，水当量氢含量为 5%，可用于水冰与挥发分探测研究．
Cabeus-A	0.32	0.39	1.43°	0.61	中	存在多处小型永久阴影区，地势平坦；位于 SPA 撞击坑盆地坑缘溅射，存在 SPA 事件物质采集可能性；以撞击坑和浅层断裂构造为主，地表溅射物来源丰富．
Cabeus-B	0.21	0.43	12.584°	0.47	优	多处小型永久阴影区，临近区域存在大型永久阴影区，可通过巡视器进入，可开展水冰与挥发分探测，地表溅射物来源丰富．
Cabeus-C	0.082	0.2	4.98°	0.296	中	存在大型永久阴影区，探测数据确切表明该区域有水冰存在，可开展水冰与挥发分探测．
Cabeus-D	0.332	0.56	5.49°	0.432	差	存在多处小型永久阴影区，可开展水冰与挥发分探测．地表溅射物来源丰富．
Shackleton-A	0.286	0.76	6.66°	0.354	优	存在多处小型永久阴影区，可开展水冰与挥发分探测； 地表有来自存在受侵蚀的弧形环段、撞击坑边缘、撞击坑壁、临近撞击坑挖掘物质等材料； 地表溅射物可能来自 SPA 盆地建造，可能有艾肯纪阿蒙森-甘斯文特盆地建造残余，薛定谔盆地建造大部分被覆盖或改造； A/B/C 距离嫦娥七号预选区约 70/50/30 公里，可与嫦娥七号协同观测．
Shackleton-B	0.288	0.65	9.34°	0.298	优	
Shackleton-C	0.311	0.75	8.15°	0.202	优	

综上，第一轮科学组选址结果如图所示，在南极 Amundsen 撞击坑、Leibniz β 高原、Cabeus 撞击坑、Shackleton 撞击坑连接脊区域中共筛选出 15 个具备较高科学价值的初选区．



For Review Only

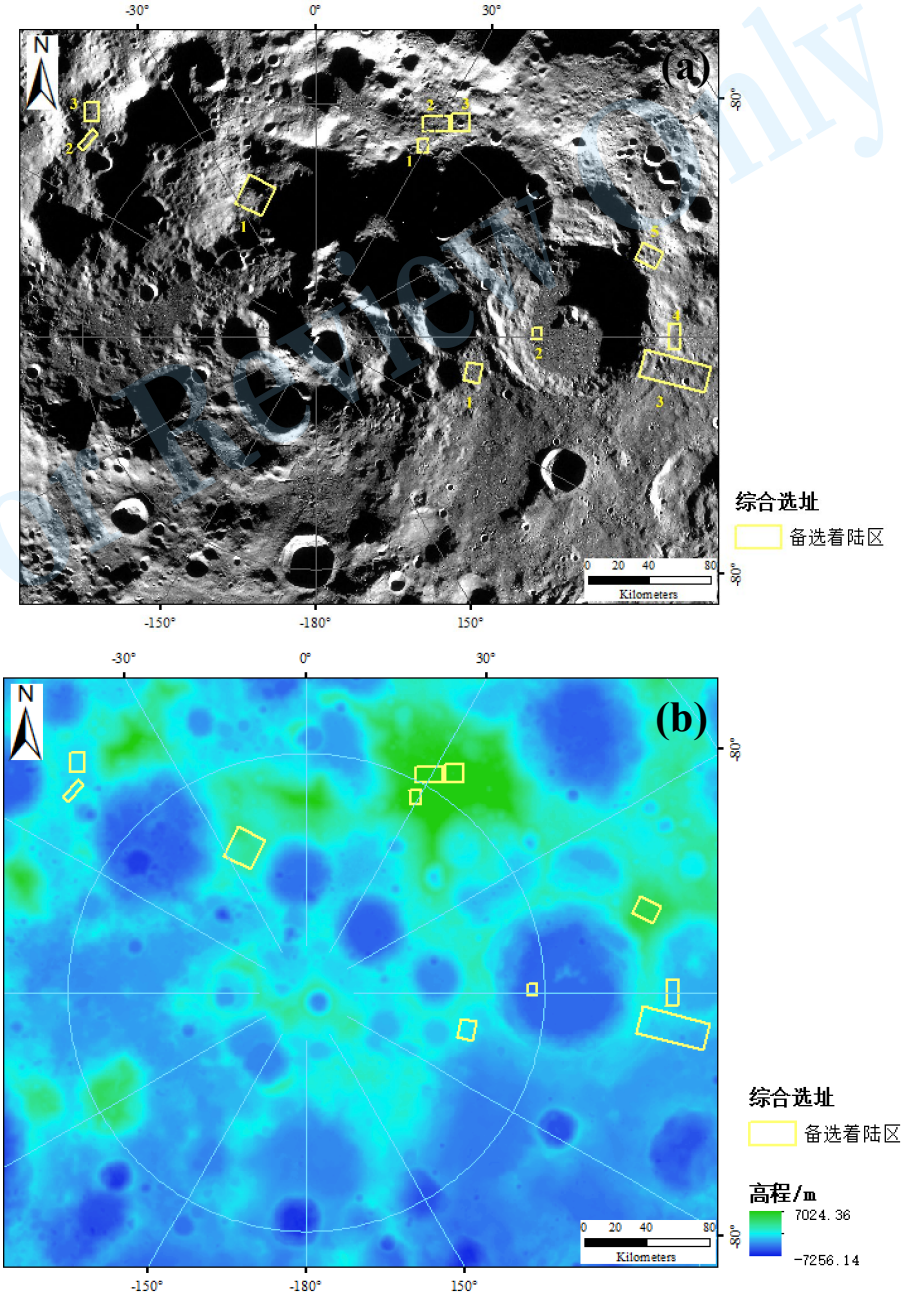
图 5 15 个科学初选区结果图

Figure 5. Results of 15 Scientific Preliminary Selection Areas

3.2 第二轮综合选址

在科学组基于专家经验法进行的第一轮科学初筛结果的基础上，通过构建选址模型实现第二轮综合选址. 对 15 个科学初选区进行了阈值筛选与数据分析，提取要素并使用层次分析法得到了网格分数值，利用热点分析法实现分值聚类， 最终热点值聚类置信度高且满足综合评估的备选站址如图所示. 共 11 个备选着陆区，分别位于 Amundsen 撞击坑、Leibniz β 高原、Cabeus 撞击坑三大区域, Shackleton 撞击坑区域未选出备选站址. 通过高程图可以看出，备选站址整体位于地势较高的高地和撞击坑坑缘的位置，这些区域将有利于探测器的着陆与通信，以及科研站的部署建设与长期运行.

Shackleton 撞击坑附近高程起伏较大，地势崎岖不平，在基于多源遥感数据的阈值筛选与数据分析过程中，对每个格网提取的坡度要素值进行阈值滤波，着陆点坡度值必须小于最大坡度值θ_{ldg_max}，若坡度值大于阈值，则该区域退出第二轮筛选，在 Shackleton 撞击坑区域存在大量坡度值不符合要求的子区域，由此剔除了较大备选范围. 并且在第二轮综合筛选的过程中，剩余子区域高分区域较少，在热点聚类时并未能构成明显高值聚类区，由此 Shackleton 撞击坑区域未选出备选站址.



For Review Only

图 6 11 个备选站址影像图和高程图

(a)影像图; (b)高程图

Figure 6 Imagery and Elevation Map of the 11 Candidate Station Sites

(a) Imagery map; (b) Elevation map

表 3 11 个备选站址信息表

Table 3. Information Table of the 11 Candidate Station Sites

区域	编号	中心坐标(保留小数点后一位)	备选站址大小/km	列举主要特点
阿蒙森撞击坑	Amundsen-1	(102.9°E, 86.5°S)	11.8×9.9	位于阿蒙森撞击坑坑沿、溅射毯附近，毗邻大型永久阴影区，存在陡坎等探测对象
	Amundsen-2	(89.3°E, 85.2°S)	6×7.3	位于撞击坑坑底，地形平坦度校好，存在小型永久阴影区，可靠近探测
	Amundsen-3	(95.5°E, 82.3°S)	43.8×17.1	邻近大型永久阴影区，附近存在多种地质构造，地势较高，便于通信和月基观测
	Amundsen-4	(89.9°E, 82.3°S)	17.1×7	位于撞击坑坑底，地形平坦度校好，便于开展巡视探测
	Amundsen-5	(76.4°E, 82.7°S)	14.8×11.1	临近区域存在小型永久阴影区，存在熔融溅射物质，地势较高，光照和通信条件好
莱布尼兹贝塔高原区域	Leibniz β-1	(29.3°E, 85.3°S)	9.2×6.7	地势较高，便于通信和观测，位于 SPA 撞击坑盆地坑缘溅射区，附近地质构造丰富
	Leibniz β-2	(29.6°E, 84.7°S)	17.6×10.2	位于高原，地势较高，光照和通信条件好，地形较平坦，地表溅射物来源丰富
	Leibniz β-3	(34.2°E, 84.5°S)	12.1×11.2	地势较高，区域存在撞击坑和阴影区，可靠近探测
卡比厄斯撞击坑	Cabeus-1	(23.3°W, 86.7°S)	20.5×18.8	位于撞击坑坑沿、溅射毯附近，地势较高，存在多处小型阴影区，可探测物质丰富
	Cabeus-2	(49.1°W, 83.5°S)	14.3×4.8	位于大型撞击坑坑沿，临近区域存在大型永久阴影区，地表溅射物来源丰富
	Cabeus-3	(44.8°W, 83.2°S)	11.6×8.5	存在多处小型永久阴影区，地形平坦，位于溅射毯区域，地表溅射物来源丰富

其中，在 Leibniz β 区域选出了 3 个备选站址，皆位于莱布尼兹高原上；在 Amundsen 区域选出了 5 个备选站址，其中 1 个区域位于坑外高地，其余 3 个区域位于坑缘地势较高的区域，另有 1 个区域位于 Amundsen 坑底平坦区域；在 Cabeus 区域选出了 3 处备选站址，皆位于 Cabeus 撞击坑外高地或地势较平坦区域.

分别对 11 个备选站址的坡度条件、光照条件、通信条件进行分析. 备选站址最短边长大于 6km，最长边长能达到 40km 以上，可以看出备选站址皆位于坡度平缓地区，区域内具备大面积平坦区域可供探测器着陆与巡视探测，具备一定的科研站布站条件. 相对来说，位于高地的备选站址区域内光照和通信条件较好，便于工程实施以及月基科学观测，例如 Leibniz β 高原区域和 Cabeus 撞击坑外区域等，另有部分备选站址靠近特殊形貌或永久阴影区，便于开展月球地质结构和原位资源开发利用等研究.

For Review Only

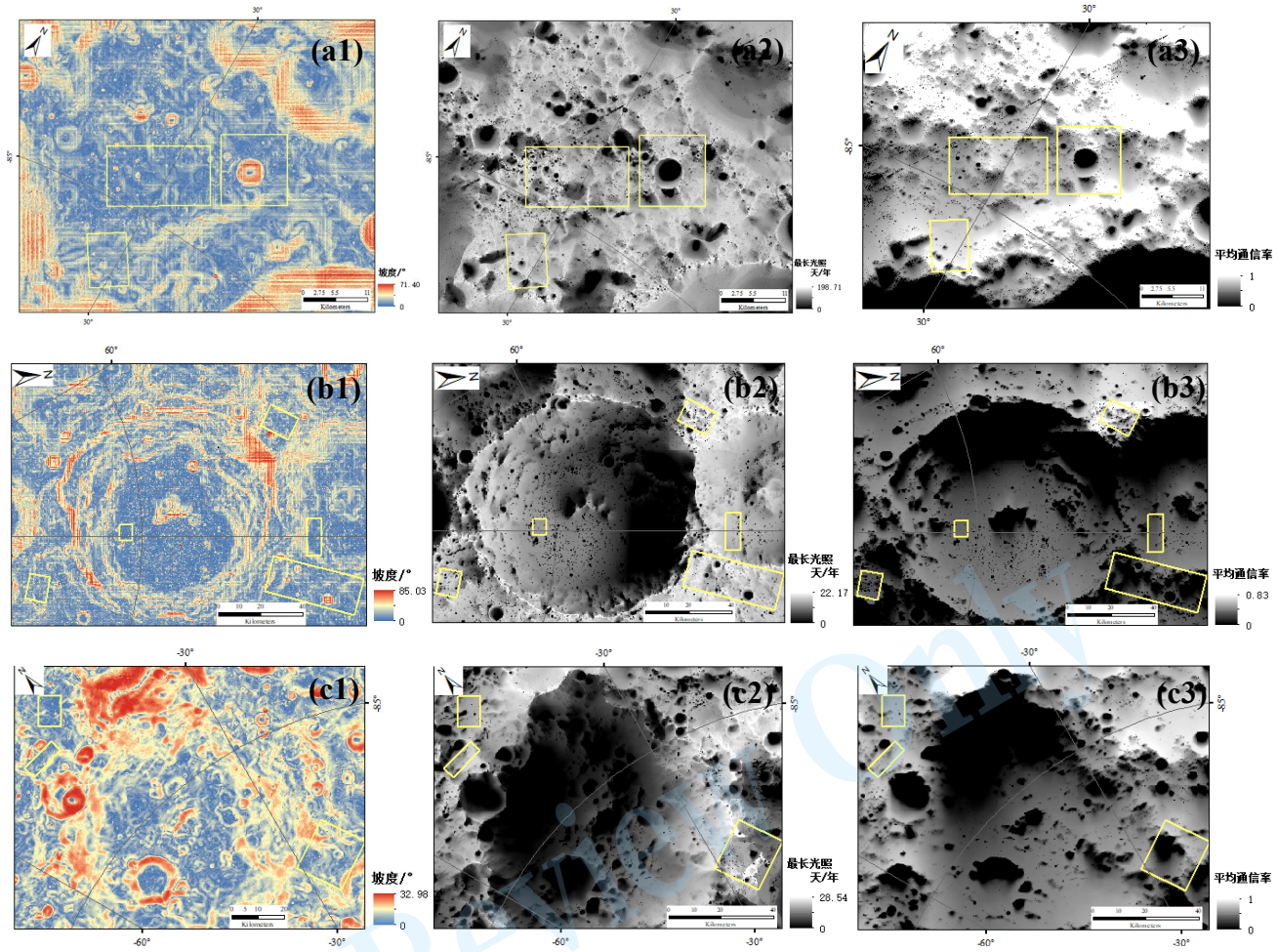


图 7 Leibniz β 区域(a)、Amundsen 区域(b)、Cabeus 区域(c)的坡度、光照、通信图

(a1) Leibniz β 区域坡度图; (a2) Leibniz β 区域光照图; (a3) Leibniz β 区域通信图; (b1)Amundsen 区域坡度图; (b2) Amundsen 区域光照图; (b3) Amundsen 区域通信图; (c1) Cabeus 区域坡度图; (c2)Cabeus 区域光照图; (c3)Cabeus 区域通信图

Figure 7. Slope, Illumination, and Communication Maps of Leibniz β Region, Amundsen Region, and Cabeus Region

(a1) Slope map of Leibniz β region; (a2) Illumination map of Leibniz β region; (a3) Communication map of Leibniz β region; (b1) Slope map of Amundsen region; (b2) Illumination map of Amundsen region; (b3) Communication map of Amundsen region; (c1) Slope map of Cabeus region; (c2) Illumination map of Cabeus region; (c3) Communication map of Cabeus region

分别对热点聚类后三大区域内备选站址的 z 得分和 p 值进行散点统计. 备选站址内 z 值得分越大表示该区域及其附近区域均具有较高的综合要素打分, 是满足高值聚类的区域, 且 p 值代表了显著性水平, 若 z 值大、p 值小, 则说明该区域高值聚集的同时并且显著, 是更为稀少独特的高价值区域, 若 p 值越趋于零, 代表热点聚类就越紧密, 由此可将其作为备选站址. 而负 z 得分分值越低, p 值也趋向于零, 表示冷点聚类就越紧密. 在 z 得分接近零的范围内, p 值上升, 代表不存在明显的空间聚类. 从图中可以看出, 备选着陆区内大部分区域聚集于正 z 高分值, 代表这些区域自身评分较高, 且被其他同样具有高分的区域所包围, 其中 Leibniz β 备选着陆区内 z 得分大于 2 以上的热点聚类区约占 68%以上, Amundsen 备选着陆区内 z 得分大于 2 以上的热点聚类区约占 81%以上, Cabeus 备选着陆区内 z 得分大于 2 以上的热点聚类区约占 94%以上.

For Review Only

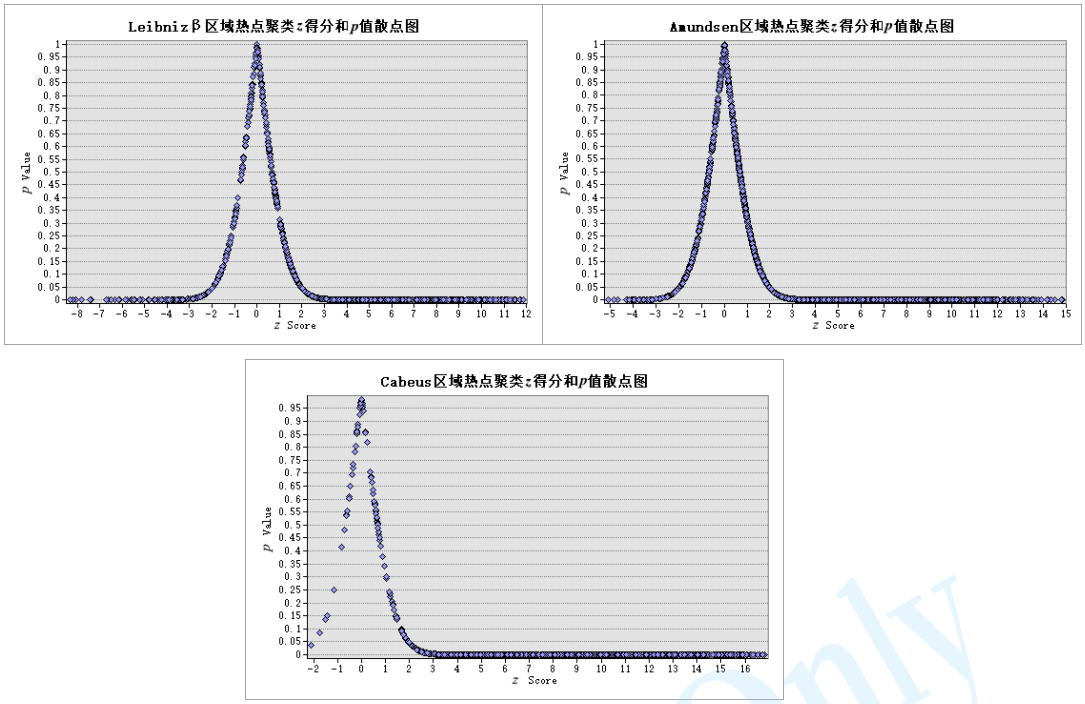
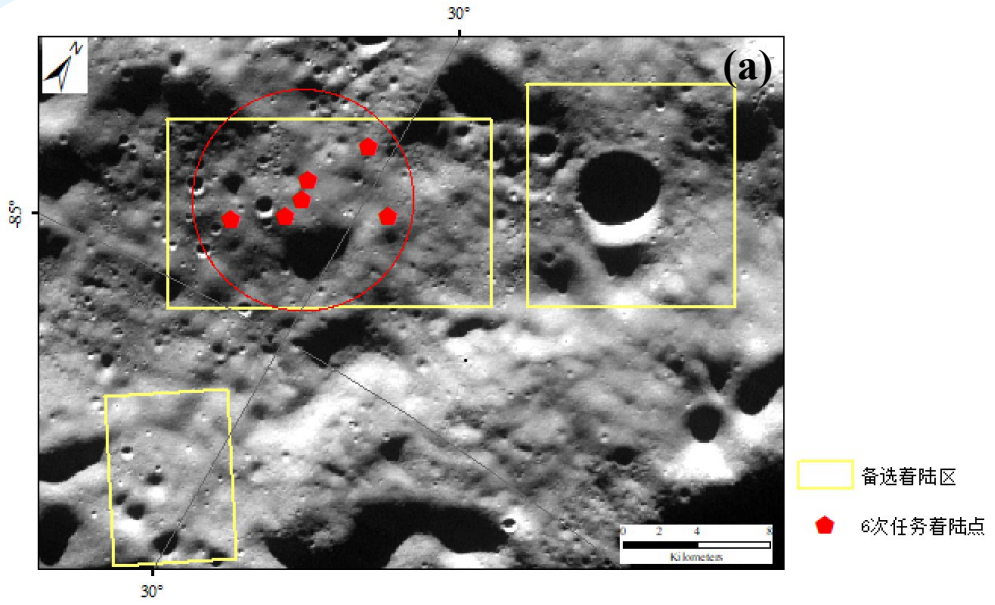


图 8 Leibniz β 区域、Amundsen 区域、Cabeus 区域热点聚类 z 得分和 p 值散点图

Figure 8. Scatter Plots of Hotspot Clustering z-Scores and p-Values for Leibniz β Region, Amundsen Region, and Cabeus Region

在 Leibniz β 高原区域的 3 个备选着陆区中，以 6 次任务建站为例，给出了 6 个参考着陆点，如图所示. 将中心点作为通信中枢，在其周围 6km 半径范围内可进行多次着陆，通过 6 次任务实现月球科研站初步布站成型. 6 次任务着陆点均选择在高值聚类区域中，且通过高程三维视图可以看出，着陆点都位于地势较高的位置，避开了坡度较大或地势较低的撞击坑区域，便于实现安全着陆与任务间通信互联.

国际月球科研站存在多次任务着陆需求，以 Leibniz β-2 备选站址为例，考虑任务间着陆安全性、月面空间堆防护距离要求，在该范围内需要存在一个半径满足 1km 的区域、以及其余半径满足 100m 的区域，以此为约束，分析可知 Leibniz β-2 备选站址最少可以支持 2336 次任务着陆与作业(含 1 次空间堆布设任务).



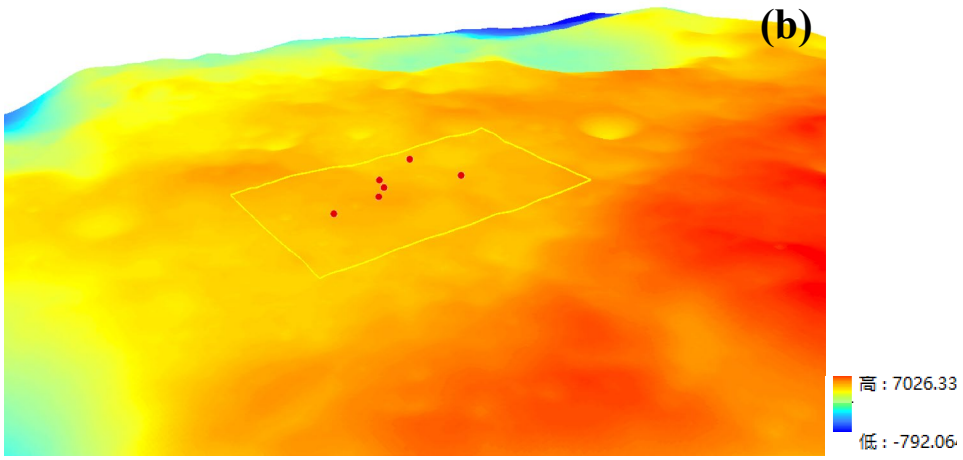


图 9 6 次任务着陆点位置参考图

(a) 6 次任务着陆点位置影像图; (b) 6 次任务着陆点位置高程三维视图

Figure 9. Reference Map of Landing Site Locations for 6 Missions

(a) Imagery map of landing site locations for 6 missions; (b) 3D elevation view of landing site locations for 6 missions

4 结　论

面向国际月球科研站以平台化形式开展科研作业活动、着陆和作业区域相对集中、任务之间高度耦合实现增量式建设等特点，本研究提出了一种考虑区域间高值聚类的定性与定量结合的综合选址方法(QUACH-SSM)，可应用于国际月球科研站站区选址工作中. 该方法整合了多种常用选址方法的优势，利用专家经验与多轮论证法实现科学与应用需求的粗选址；基于多源遥感观测数据的阈值筛选分析与多目标多要素选址方法实现基于工程约束的复选址；最后引入区域间热点分析与综合模型评估实现高评分选址区域的聚类与细选址，最终得出月球南极区域11 个备选站址.

综合选址方法 QUACH-SSM 融合了专家经验与数据驱动思路，针对现有选址方法缺乏定性分析、难以满足月球科研站平台化与集群化需求的问题，创新性地将热点聚类分析与综合评估模型融入选址全过程，既突破单一方法的局限，又完善了多目标选址的分析框架，提升了选址结果的科学性与适配性，弥补了现有研究在区域协同聚类分析方面的不足，可为国际月球科研站多器协同着陆、长期可靠运行与规模化科研作业提供更具科学性与可操作性的站址方案支撑，具有较强的工程实用价值与任务应用前景. 该方法在嫦娥八号任务中得到了应用，也可为国际月球科研站建设和其他相关深空探测任务选址研究提供参考.

致谢　谨向国际月球科研站科学选址组全体专家致以诚挚谢意. 本论文关于国际月球科研站选址的科学需求分析与科学选址论证，得到各位专家的悉心指导与大力支持，为本研究的顺利推进提供了关键支撑，特此致谢! 同时，向为本研究提供科学数据支撑的各位老师致以衷心感谢.

参考文献

1　Pei Z Y, Liu J Z, Wang Q, et al. Overview of lunar exploration and international lunar research station (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2577–2586[裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站. 科学通报, 2020, 65: 2577–2586]

2　Pei Z Y, Wang Q. Strategic concept of resource utilization development route of the international lunar research station (in Chinese). J Astronaut, 2024, 45: 625–637[裴照宇, 王琼. 国际月球科研站资源利用发展路线战略构想. 宇航学报, 2024, 45: 625–637]

3　Liu D, Gan H, Wei G F, et al. Analysis of lunar south pole landing site selection based on illumination and slope constraints (in Chinese). J Deep Space Explor, 2023, 10: 544–556[刘丹, 甘红, 魏广飞, 等. 基于光照和坡度约束的月球南极着陆选址分析. 深空探测学报(中英文), 2023, 10: 544–556]

4　Du X, Kang Z Z, Hu T, et al. Application of topography analysis based on multi-source data in the construction of the International Lunar

For Review Only

Research Station (in Chinese). Remote Sens, 2025, 29: 442–459[杜省, 康志忠, 胡腾, 等. 基于多源数据的形貌分析在国际月球科研站建设中的应用. 遥感学报, 2025, 29: 442–459]
5 Rao W, Fang Y, Peng S, et al. Landing site selection method of lunar south pole region (in Chinese). J Deep Space Explor, 2022, 9: 571–578[饶炜, 方越, 彭松, 等. 月球南极探测着陆区选址方法. 深空探测学报(中英文), 2022, 9: 571–578]
6 Zhang H, Du Y, Li F, et al. Suggestions for site selection of lunar south pole exploration landing project (in Chinese). J Deep Space Explor, 2020, 7: 232–240[张熇, 杜宇, 李飞, 等. 月球南极探测着陆工程选址建议. 深空探测学报(中英文), 2020, 7: 232–240]
7 Xiao L, Qiao L, Xiao Z Y, et al. Major scientific objectives and candidate landing site suggested for future lunar exploration (in Chinese). Sci China-Phys Mech Astron, 2016, 46: 9–30[肖龙, 乔乐, 肖智勇, 等. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及着陆区选址建议. 中国科学:物理学力学天文学, 2016, 46: 9–30]
8 E. J. Speyerer, M. S. Robinson and B. Bussey. Optimizing lunar exploration: a multidimensional approach to landing site selection. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2025, 22: 1–5
9 Liu H, Wang Y, Wen S, et al. A new blind selection approach for lunar landing zones based on engineering constraints using sliding window. Remote Sens, 2023, 15, 3184
10 Feng Y J, Tang P L, Chen S R, et al. Intelligent site selection of key areas for lunar research stations and analysis of typical environmental factors (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci), 2024, 52: 1163–1170[冯永玖, 唐盼丽, 陈书睿, 等. 月球科研站关键区域智能选址及其典型环境要素分析. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52: 1163–1170]
11 Chen C T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. Fuzzy Sets Syst, 2000, 114: 1–9
12 Juan M S L, Eloy P A, Valentin T. B. Prioritizing astronaut traverses on the Moon: A multi-criteria decision-making approach. Acta Astronaut, 2025, 229: 77–89
13 Grace, C. A. Z., Soundranayagam, J. P., Promilton, A. J. A. A., et al. Integrating remote sensing and geospatial-based comprehensive multi-criteria decision analysis approach for sustainable coastal solar site selection in southern India. ISPRS Int J Geo-Inf, 2025, 14: 377
14 Eloy P A, Álvaro-Steve N A, Juan M S L. Evaluating potential landing sites for the Artemis III mission using a multi-criteria decision making approach. Acta Astronaut, 2025, 226: 469–478
15 Li Y, Zhang X S, Lv J Y, et al. A multi-objective multi-factor integrated method for comprehensive luna base site selection. Geo-Spat Inf Sci, 2025, doi: 10.1080/10095020.2025.2495682
16 Wang C, Lin Y T, Pei Z Y, et al. Key scientific issues of lunar research stations (in Chinese). China Sci Fund, 2022, 36: 830–840[王赤, 林杨挺, 裴照宇, 等. 月球科研站的关键科学问题. 中国科学基金, 2022, 36: 830–840]
17 Pei Z Y, Wang Q, Xu L, et al. Strategic analysis of scientific activities and study on the overall plan of scientific operation platforms based on the lunar research station (in Chinese). Chin J Space Sci, 2025, 45: 1–14[裴照宇, 王琼, 徐琳, 等. 基于月球科研站的科研活动战略分析及其作业平台总体方案研究. 空间科学学报, 2025, 45: 1–14]
18 Li S D, Chen X S, Li J, et al. Planetary engineering geology problems and key technologies (in Chinese). J Eng Geol, 2024, 32: 2298–2322[李守定, 陈薪硕, 李娟, 等. 行星工程地质问题与关键技术. 工程地质学报, 2024, 32: 2298–2322]
19 Wueller L, Xu X, Iqbal W, et al. Science objectives and design reference mission to Rubin crater on Mons Amundsen near the south pole of the Moon. Adv Space Res, 2025, 76: 796–810
20 Jia Y Z, Zou Y L. Analysis of site selection requirements for lunar bases based on lunar earth observation (in Chinese). Spacecr Eng, 206, 25: 116–121[贾瑛卓, 邹永廖. 月基对地观测对月球基地选址需求分析. 航天器工程, 206, 25: 116–121]
21 Wang H J, Jiang X J, Deng Y Y, et al. Research on methods for site selection for lunar-based UV-Optical-IR astronomical observation (in Chinese). J Space Sci Exp, 2024, 1: 33–39[王汇娟, 姜晓军, 邓元勇, 等. 月基紫外-光学-红外天文观测站点选取方法研究. 空间科学与试验学报, 2024, 1: 33–39]
22 Zhang J D, Li X Y, Ping J S. Analysis of site selection for lunar south pole lunar base platform (in Chinese). J Deep Space Explor, 2022, 9: 292–299[张吉栋, 李向月, 平劲松. 月球南极月基平台选址分析. 深空探测学报(中英文), 2022, 9: 292–299]
23 Zhou C, Qin W B, Gao Y Y, et al. Investigation on mission requirements and key technologies for in-situ utilization of extraterrestrial resources (in Chinese). China Eng Sci, 2025, 27: 234–246[周诚, 覃文波, 高玉月, 等. 地外原位资源利用任务需求与关键技术调查研究. 中国工程科学, 2025, 27: 234–246]
24 Gao N, Xu Y K, Luo T Y, et al. Recent advance and prospect of the lunar mineral resources exploration. Acta Mineral Sinica, 2022, 42: 222–230
25 Flahaut J., J. Carpenter, J. P. Williams, et al. Regions of interest (ROI) for future exploration missions to the lunar south pole. Planet Space Sci, 2020, 180, 104750
26 Kyeong J. K, Christian W, Alexey A. B, et al. Prospective 3He-rich landing sites on the moon. Planet Space Sci, 2019, 177, 104686

For Review Only

27 Pham, MP., Nguyen, K.Q., Vu, G.D. et al. Drought risk index for agricultural land based on a multi-criteria evaluation. Model Earth Syst Environ, 2022, 8: 5535–5546

28 Golombek, M., Grant, J., Kipp, D. et al. Selection of the Mars Science Laboratory Landing Site. Space Sci Rev, 2012, 170: 641–737

29 Li F, Zhang H, Wu X Y, et al. Key characteristics analysis of the lunar south pole landing site (in Chinese). Spacecr Eng, 2015, 24: 103–110[李飞, 张熇, 吴学英, 等. 月球南极着陆区关键特性分析. 航天器工程, 2015, 24: 103–110]

30 Hu T, Yang Z, Li M, et al. Possible sites for a Chinese international lunar research station in the lunar south polar region. Planet Space Sci, 2023, 227, 105623

31 Meng Z G, Chang W Q, Shen C, et al. Site selection and potential scientific target analysis of Mare Smythii lunar long-term research station (in Chinese). J Deep Space Explor, 2022, 9: 521–531[孟治国, 常文清, 沈朝, 等. 史密斯海月球长期科研站选址与潜在科学目标分析. 深空探测学报(中英文), 2022, 9: 521–531]

32 SAATY, R. W. The analytic hierarchy process: what it is and how it is used. Math Model, 1987, 9: 161–176

33 Higgins, M., H. Benaroya. Utilizing the analytical hierarchy process to determine the optimal lunar habitat configuration. Acta Astronaut, 2020, 173: 145–154

34 Pant, S., Kumar, A., Ram, M. et al. Consistency indices in analytic hierarchy process: a review. Mathematics, 2022, 10, 1206

35 Bose, A. Consistency re-evaluation in analytic hierarchy process based on simulated consistent matrices. J Multi-Criteria Decis Anal, 2022, 29: 393–401

36 J. M. Lafleur. Probabilistic AHP and TOPSIS for multi-attribute decision-making under uncertainty. Aerosp Conf, 2011. 1–18

37 Ord, J.K. ,A. Getis. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. Geogr Anal, 1995, 27: 286–306

Research on Comprehensive Site Selection of the International Lunar Research Station

DU Xing[1], XU Lin[2], WANG Qiong[3*], FANG Yue[4], JIA Yingzhuo[2], KANG Zhizhong[5], PEI Zhaoyu[3*], PENG Jing[4], ZOU Yongliao[2], HU Teng[5], HE Huaiyu[6], WANG Chi[2]

[1] *Deep Space Exploration Laboratory (Tiandu Laboratory), Beijing 100195, China;*
[2] *National Space Science Center, China Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
[3] *Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China;*
[4] *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;*
[5] *Research Center for Remote Sensing of the Moon and Planets, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*
[6] *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China*

Lunar exploration is transitioning from single-mission implementation to long-term residency and interdisciplinary collaborative research. Addressing the characteristics of the International Lunar Research Station (ILRS), such as conducting scientific research activities in a platform-based manner, relatively concentrated landing and operation areas, and highly coupled missions to achieve incremental construction, this study proposes a Comprehensive Site Selection Method Combining Qualitative and Quantitative Analysis with Consideration of High-Value Clustering Between Regions (QUACH-SSM) for the site selection of the ILRS. Firstly, using scientific objectives as input, the method leverages expert experience and multi-round demonstrations to achieve preliminary site selection based on scientific and application requirements. Secondly, it implements re-selection based on engineering constraints through threshold screening analysis of multi-source remote sensing observation data and a multi-objective, multi-factor site-selection approach. Finally, it introduces inter-regional hot-spot analysis and a comprehensive evaluation model to realize clustering and detailed selection of high-scoring areas, ultimately identifying 11 candidate sites in the lunar south-pole region. This comprehensive site selection method has been applied to the Chang'E-8 mission and can also serve as a reference for ILRS construction and site selection research for other related deep-space exploration missions.

International Lunar Research Station (ILRS); comprehensive site selection; QUACH-SSM; high-value clustering; site selection model

doi:

XX

For Review Only